

УДК 629.76; 629.78

## **Вероятностный анализ результативности ультраструйных гидрофизических технологий**

**Голубев Е.С.<sup>1\*</sup>, Мугла Д.Р.<sup>1\*\*</sup>, Барзов А.А.<sup>2\*\*\*</sup>, Сысоев Н.Н.<sup>2\*\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), МГТУ имени Н.Э.Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия*

*\*e-mail: evgenijgolubev@rambler.ru*

*\*\*e-mail: mdr@bmstu.ru*

*\*\*\*e-mail: A.A.BARZOV@gmail.com*

*\*\*\*\*e-mail: nn.sysoev@physics,msu.ru*

### **Аннотация**

Рассматривается сравнительная результативность различных научно-прикладных подходов к изучению ультраструйных гидрофизических технологий. На конкретном примере определения оптимальной длины сопла, формирующего режущую абразивно-жидкостную струю, показана возможность эффективного построения аппарата вероятностного моделирования. Приведены результаты решения этой задачи имитационным моделированием методом Монте-Карло, дополненного прямыми экспериментальными исследованиями. Намечены перспективы развития предложенного подхода в сфере анализа ультраструйных гидрофизических технологий.

**Ключевые слова:** ультразвуковые технологии, акустическая эмиссия, метод конечных элементов, ультразвука, фокусирующее гидроабразивное сопло, абразив, гидроабразивная обработка, фокусирующая трубка.

Высокая трудоёмкость и стоимость прямого экспериментального анализа результативности различных операционных ультразвуковых технологий (УСТ), а также поиск оптимальных режимов их реализации в производственных условиях являются причинами необходимости развития аппарата теоретического изучения и математического моделирования процессов взаимодействия ультразвука (УС) с обрабатываемым материалом [1,2]. Кроме того, весьма актуальна задача создания соответствующих инженерных методик экспресс-определения рациональных условий ультразвуковой обработки материалов и жидкостей, в частности методом акустической эмиссии [3,4]. В связи с этим в тезисном виде сформулируем основные варианты анализа и оптимизации физико-технологических параметров УСТ, призванные обеспечить их малозатратное определение на ранних этапах технологической подготовки производства. При этом будем учитывать взаимосвязанность физически доминирующих процессов УСТ, в частности усталостно-дискретной УС - эрозии поверхности обрабатываемого материала или твердотельной мишени с входными физическими характеристиками различных операционных УСТ и их выходными параметрами. Структурная схема этой функционально-технологической взаимосвязанности показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурно-функциональная взаимосвязанность физико-технологических и эксплуатационных характеристик операционных УСТ

# Основные методы анализа процессно-операционных УСТ

## 1. Феноменологическое моделирование

Применительно к гидроабразивной обработке (ГАО) материалов в основе анализа лежит предположение о наличии связи между интенсивностью разгона дисперсно-абразивных частиц (ДАЧ) по длине фокусирующего гидроабразивного сопла (ФАС). Эта функциональная зависимость имеет вид:

$$\frac{dV_a(x)}{dx} = -\alpha[V_c(x) - V_a(x)]^n \quad (1)$$

где:  $V_a(x)$  и  $V_c(x)$  – соответственно скорости движения ДАЧ и УС при текущем значении координаты ( $x$ ) внутреннего канала ФАС;  $\alpha$  и  $n$  – коэффициенты, учитывающие специфику гидродинамики поведения ДАЧ в канале ФАС, а также его геометрические характеристики и физико-энергетические параметры УС.

Достоинством феноменологического подхода является возможность построения соответствующих моделей при разумном количестве установочных экспериментов.

К его недостаткам следует отнести ограниченную общность результатов моделирования.

## 2. Моделирование кинетики разгона ДАЧ

В этом случае составляются уравнения движения частицы абразива:

$$m\ddot{x} = F_{yC} - F_T \quad (2)$$

$$J\ddot{\varphi} = M_{yC} - M_T \quad (3)$$

где:  $m$  и  $J$  – соответственно масса ДАЧ и её момент инерции;  $F_{yC}$  и  $M_{yC}$  – соответственно гидродинамическая сила и момент, действующие на поверхность ДАЧ со стороны УС и приводящие к её разгону;  $F_T$  и  $M_T$  – соответственно сила и

момент, препятствующие разгону ДАЧ, т.е. факторы тормозящие кинетику этого процесса во времени (t), например трение о стенку канала ФАС. Причём (2) и (3) определяют динамику касания ДАЧ с их интенсивным проскальзыванием.

Уравнения (2) и (3) обладают достаточной общностью, но определение их правых частей вызывает значительные теоретические трудности и требует постановки специальных установочно-верификационных экспериментов.

### 3. Конечно-элементное моделирование

Реализация процедуры анализа методом конечных элементов (МКЭ) гидродинамической специфики поведения УС в канале ФАС, а также процесс разгона ДАЧ представляют серьёзные трудности. Однако в случае экспериментально подтверждённого успеха в построении реалистичной физико-технологической модели МКЭ формирования УС, оснащённой ДАЧ, как инструмента реализации функциональных возможностей данной производственной технологии, имеет серьёзное научно-прикладное значение. Оно обусловлено тем, что результаты этого вида моделирования можно не только использовать при вариативно-оптимизационном конструкторско-технологическом проектировании операций УСТ, но и применять как средство верификации других подходов и моделей, связанных с решением конкретных задач определения рациональных режимов УС-обработки материалов и жидкостей.

Не трудно заметить, что вышерассмотренные классифицирующие предложения по созданию и совершенствованию аппарата анализа и оптимизации УСТ в своей основе используют детерминированное описание изучаемых закономерностей, которое имеет определённые ограничения методологического

характера. Поэтому, учитывая весьма значительное число взаимодействующих в процессе УС-обработки (УСО) физико-технологических элементов, которые обладают вариативными энерго-функциональными характеристиками, можно с большей долей уверенности предположить наличие высокого потенциала результативности процедуры описания и моделирования данных взаимодействий с вероятностных позиций [5-6]. Проиллюстрируем вышеизложенное на примере формирования гидроабразивной ультразвуки (ГАУС), которое определяется схематично рассмотренным выше процессом разгона ДАЧ под действием УС в рабочем канале ФАС.

Допустим, что вероятность неприращения скорости ДАЧ в сечении ФАС с координатой  $x$  составляет  $P^*(x)$ , а с координатой  $x_1$  – соответственно  $P^*(x_1)$ . Далее, используя алгоритм рассуждений подробно рассмотренный пример в [7] в нашем случае, получим:

$$P(x) = 1 - P^*(x) = 1 - \exp(-cx) \quad (4)$$

где:  $c$  – параметр, однозначно связанный с массовой концентрацией ДАЧ в УС и существенным образом влияющий на результативность УСО в целом;  $P(x)$  – вероятность достижения ДАЧ в сечении ФАС с координатой  $x$  расчётно-теоретического значения  $V_a(x)$ .

Считая, что вероятностная характеристика ГАУС в виде  $P^*(x)$  – фактически учитывающая совокупность тормозящих разгон ДАЧ факторов и вероятность  $P(x)$  – теоретически отражающая кинетику увеличения их скорости, представляют собой

одновременно происходящие процессы, их результирующую вероятность  $P(x)$  можно представить как:

$$P(x) = \exp(-cx) \cdot [1 - k \cdot \exp(-cx)] \quad (5)$$

где:  $k$  - экспериментально определяемый коэффициент отражающий квазиполноту группы событий: разгон – торможение ДАЧ.

Заметим, что (5) обладает высокой пластичностью при описании кинетики формирования ГАУС и содержит только одну экспериментально определяемую константу. Причём, необходимая физико-технологическая гибкость вероятностной модели (5) достигается логически-рациональной комбинацией экспоненциальных сомножителей. Проиллюстрируем это положение конкретным примером [9-13].

Используем модель (5) для решения практически весьма значимой задачи по определению оптимальной длины ФАС, обеспечивающей максимальную производительность ГАО [14-16]. Для этого положим, что  $x = L$  – оптимизируемое значение длины ФАС, обеспечивающее максимальную скорость ДТЧ на выходе из сопла. Очевидно, что при малом  $L(\min)$  исходная гидро УС «не успеет» разогнать ДТЧ, а при избыточно длинном ФАС, т.е. при  $L > L_{opt}$  ( $V_a < \max$ ) ДТЧ и ГАУСС в целом будут заторможены силами трения о стенки канала ФАС. Данное физическое обоснование наличия  $L_{opt}$  - оптимальной длины ФАС, обеспечивающей максимально-достижимую скорость ДТЧ не трудно формализовать математически по стандартной процедуре:

$$\frac{\partial P(L)}{\partial L} = 0; \quad \frac{\partial^2 P(L)}{\partial L^2} < 0 \quad (6)$$

Сделаем несколько уточняющих замечаний:

1. Для повышения наглядности (6) можно использовать соответствующие, например, квадратичное разложение (5), учитывая, что на практике  $c$  – концентрация ДТЧ в УС относительно мала ( $c=0,1-0,25$ )

2. Теоретическое предельно достижимое  $V_a(max)$  максимальное значение скорости ДТЧ определяется из закона сохранения импульса ГАУСС без учета потерь:

$$V_a(max) = \frac{1}{1+c} V_{Oc} \quad (7)$$

где:  $V_{Oc} = \sqrt{2P/\rho}$  – расчетная начальная скорость УС на входе в канал ФАС;  $P$  – рабочее давление сжатия гидросреды (воды);  $\rho$  – ее плотность.

3. Для определения значения коэффициента  $k$ , фактически комплексно учитывающего кинетику функционально-технологического обеспечения движения ДАЧ: соотношения диаметров частиц абразива и УС, формы канала ФАС и т.д. необходима постановка прямых верификационных экспериментов. При этом  $k$  может изменяться в процессе УСО, например, из-за износа канала ФАС. Поэтому конструкторско-технологическая реализация  $L_{opt}$  в математическом точном смысле невозможна. В связи с этим следует определять некоторое значение  $L_R$  – рациональную длину ФАС в определенном интервале изменения  $c$  (вблизи его оптимального технико-экономического значения) и величине  $k$ , при технологически допустимом износе канала ФАС. Заметим что, экспериментально определимый коэффициент  $k$  находится в диапазоне  $1,3 < k < 2$ .

Весомым преимуществом вероятностного подхода к моделированию условий осуществления УСТ, в частности при определении рациональной длины ФАС является возможность реализации процедуры имитационного моделирования,



например, методом Монте-Карло. Это позволяет при весьма ограниченном числе прямых установочно-верификационных экспериментов сформировать значительные по объему и содержательности массивы физико-технологической информации о взаимовлиянии факторов функциональной результативности ГАУС и операций УСТ в целом [17-20].

На рисунке 2 представлены в иллюстративном виде обобщенные данные по анализу возможностей вероятностного моделирования, в частности при решении задачи по определению  $L_R$  – рационального значения длины ФАС, как важнейшего фактора эффективности осуществления различных операций по ГАО материалов.

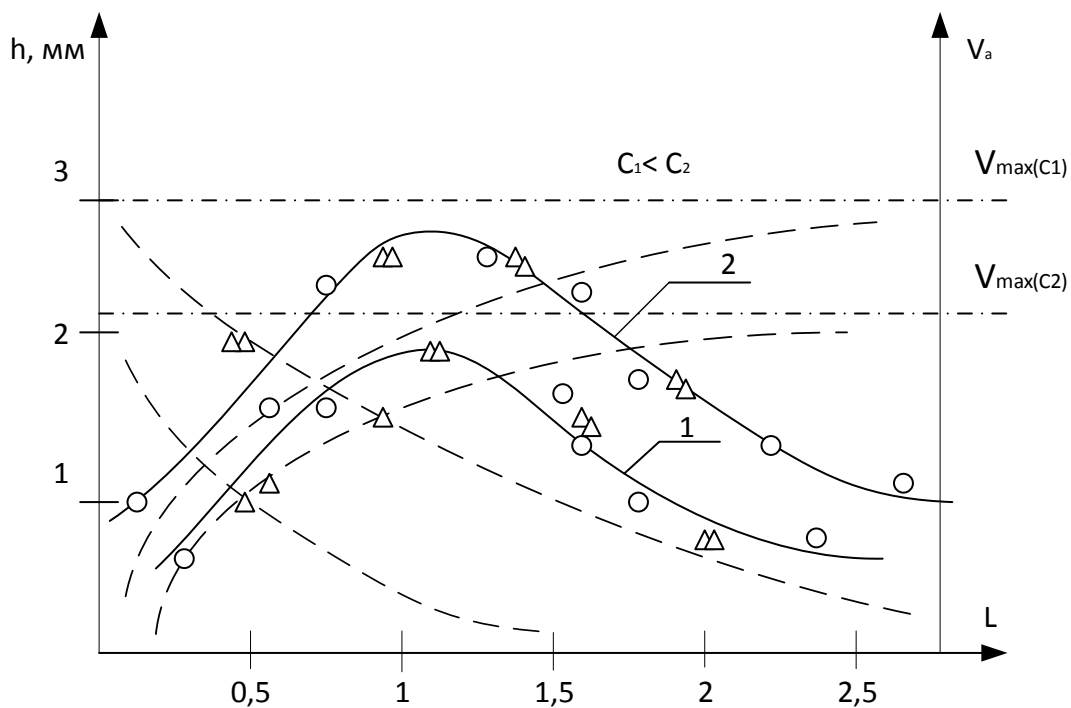


Рисунок 2- Обобщенные результаты теоретического и экспериментального определения рациональной длины фокусирующего абразивного сопла (ФАС) по критерию производительности ГАО

— — — — — линии, описывающие характер поведения сомножителей

— . — . — асимптотические значения теоретической величины  $V_{a(\max)}$

1 – изменение функции (5) в зоне технологически избыточной концентрации ДАЧ ( $c \sim 35\%$ )

2- характер поведения зависимости (5) при функционально-рациональной рациональной концентрации ДАЧ ( $c \sim 18\%$ )

$\Delta$ - результаты установочно-верификационных экспериментов при различных значениях  $L$  -длины ФАС

О - результаты имитационного моделирования

$h$  – глубина (в мм) паза, прорезаемого ГАУС в образце из материала Д16 на гидротехнологической установке при рабочем давлении  $P=420$  МПа.

Методически изменение  $L$  - длины ФАС обеспечивалось следующим образом.

Использовались два ФАС, которые с помощью стыковочного устройства формировали экспериментальное сопло общей длиной  $2L$ , где  $L$  – длина стандартного ФАС. После проведения эксперимента, одно сопло разделялось на две части, каждая из которых имела длину  $0,5L$ . Затем, комбинируя эти части в стыковочном устройстве, проводились эксперименты при длине ФАС  $0,5L$  и  $1,5L$ , а также на стандартном ФАС длиной  $L$ .

По результатам выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать предварительные обобщения и выводы, а также сформулировать перспективы развития вероятностного предлагаемого подхода к анализу и оптимизации по УСТ.

1. Исходя из полученных данных можно утверждать, что оптимальная длина ФАС зависит от нескольких параметров, в частности от концентрации ДАЧ в УС.

Поэтому на практике, исходя из ограниченного числа экспериментов определяются значения коэффициентов в предложенной вероятностной модели (5, 8). Далее осуществляется построение соответствующих функциональных зависимостей и с использованием процедуры имитационного моделирования определяется рациональная длина ФАС в определенном интервале изменения других физико-технологических параметров ГАО.

2. Результативность методики определения рационального значения длины ФАС можно существенно повысить, если в ходе прямых экспериментов использовать аппарат экспресс-диагностики условий осуществления ГАО методом акустической эмиссии [8].

3. При проведении установочно-верификационных экспериментов можно рекомендовать изготовление опытных образцов ФАС из обычных конструкционных материалов в целях резкого сокращения затрат данного этапа технологической подготовки производства с использованием операции по ГАО.

Таблица 1

Результаты экспертно-аналитического анализа возможностей  
использования различных методов анализа в УСТ  
(по методике предложенной в [7])

Наименование метода	ФМ	ДМ	КЭМ	ВМ	ЭИ
Ожидаемая результативность	0,6	0,5	0,9	1,0	0,4

В таблице 1 приняты следующие сокращения: ФМ – феноменологическое моделирование; ДМ – динамическое моделирование на основе решения уравнений

движения ДАЧ в УС; КЭМ –конечно-элементное моделирование; ВМ – вероятностное моделирование; ЭИ – прямые экспериментальные исследования.

Примечание. Под результативностью понимается отношение эффективности рассматриваемого метода анализа УСТ к общим затратам на его реализацию.

Подводя итог вышеизложенному, можно утверждать, что разрабатываемый вероятностный подход и оптимизации операционных УСТ, в частности при определении рациональной длины ФАС по результативности превосходит иные подходы, что отражено в табл. 1. Поэтому его развитие, особенно с учётом энерго-вероятностных параметров не только ГАУСС, но и физико-механических свойств обрабатываемых материалов, полученных разными способами, в частности для решения задач по их УС-диагностике, например, при оценке анизотропии материалов, полученных селективным лазерным сплавлением, обладает значительным потенциалом научно-прикладного совершенствования и практического применения.

*Исследования проведены в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-3778.2018.8).*

### **Библиографический список**

1. Абашин М.И. Возможности экспресс-оценки информационно-диагностических параметров изделий ультразвуковым методом // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2011. № 4-3 (288). С. 128 - 133.

2. Барзов А.А. Эмиссионная технологическая диагностика. - М.: Машиностроение, 2005. - 384 с.
3. Барзов А.А., Галиновский А.Л., Моисеев В.А., Мугла Д.Р., Яковлев Р.В. Вероятностная модель технико-экономической оптимизации структуры информационно-диагностического обеспечения трудноконтролируемых технологических процессов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 5. С.73 - 80.
4. Галиновский А.Л., Зосимов М.В., Моисеев В.А., Хафизов М.В. Повышение эффективности гидрорезания средствами акустической эмиссии // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. 2014. Т. 20. № 6. С. 59 - 62.
5. Веселов М.В., Коротков А.Н. Моделирование процесса гидроабразивной обработки как неотъемлемый этап разработки оборудования // Международная научно-практическая конференция «Современные научно-практические достижения». Сборник трудов. (Кемерово, 05-06 мая 2015). – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2015. С. 162 - 165.
6. Барзов А.А., Галиновский А.Л., Абашин М.И. Факторная модель ультразвуковой гидроэрозии // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 10. С. 63 - 68.
7. Яковлев Р.В. Конструкторско-технологические решения повышения производительности установки ультразвуковой обработки суспензирования жидкофазных структур // Политехнический молодежный журнал. 2017. №5 (10). С. 9.

8. Кан Ю.С., Травин А.А. Программный комплекс вероятностного анализа систем с кусочно-линейной структурой // Труды МАИ. 2014. № 72. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=47327>
9. Золотов А.А., Нурулаев Э.Д. Нормирования ресурса технических систем с учётом планового профилактического обслуживания, аварийных и плановых замен. // Труды МАИ. 2013. № 64. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36457>
10. Сысуев А.В. Оценивание преимущества вероятностного подхода к анализу систем по отношению к гарантирующему в присутствии малого случайного параметра // Труды МАИ. 2010. № 38. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=14164>
11. Абашин М.И., Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Коберник Н.В. Ультразвуковая диагностика качества сварных швов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 12(669). С. 52 - 61. DOI: [10.18698/0536-1044-2015-12-52-61](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2015-12-52-61)
12. Кременецкий Н.О., Левкин А.А., Проваторов А.С. Применение метода экспертных оценок при обосновании инновационно-диагностического потенциала физико-технологических воздействий // Молодежный научно-технический вестник. 2015. № 6. С. 10.
13. Абашин М.И., Галиновский А.Л., Моисеев В.А., Осипков А.С., Проваторов А.С. К вопросу разработки научно-методической базы получения и диагностики наноструктурных покрытий // Наноинженерия. 2014. № 5(35). С. 23 - 27.

14. Абашин М.И., Барзов А.А., Денчик А.И., Мусина Ж.К. Анализ инновационного потенциала ультразвуковых гидротехнологий // Наука и техника Казахстана. 2016. № 3-4. С. 7 - 15.
15. Моисеев В.А., Галиновский А.Л., Абашин М.И., Хахалин А.В. Сопоставительный анализ методов оценки качества наноструктурированных покрытий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 6(308). С. 132 - 136.
16. Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Моисеев В.А. Техно-экономическое обоснование выполнения контрольно-диагностических операций // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2015. № 1(309). С. 133 - 139.
17. Галиновский А.Л., Самсонов К.С., Севрюкова А.В., Салахатдинова А.Р. Сравнение различных методов контроля и диагностики качества керамики методом экспертного оценивания // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2017. №1(19). С. 64 - 74.
18. Барзов А.А., Вельтищев В.В., Галиновский А.Л., Мугла Д.Р. Кинетический анализ механизма автоколебаний массовой концентрации дисперсно-твердофазных частиц в гидроультраструю // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 1(694). С. 55 - 62.
19. Крашенников А.И., Тюрина С.А., Пупченков Г.С. Исследование процесса гироструйной обработки металлоконструкций // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Машиностроение. 2009. № 20. С. 14 - 22.

20. Степанов Ю.С., Бурнашов М.А., Прежбилов А.Н. Перспективы развития гидроструйных технологий в машиностроении // Вестник современных технологий. 2016. № 3(3). С. 68 - 75.
21. Hisakado T., Tanaka T., Suda H. Effect of abrasive particle size on fraction of debris removed from plowing volume in abrasive wear // Wear, 1999, vol. 236, no. 1-2, pp. 24 - 33.
22. Precision Hydraulic Cutting // Mechanical Engineering, 1994, vol. 116, no. 11, pp. 58.
23. Arola D., McCain M.L., Kunaporn S., Ramulu M. Waterjet and abrasive surface treatment of titanium: a comparison of surface texture and residual stress // Wear, 2001, vol. 249, no. 10-11, pp. 943 - 950.
24. Kunaporn S., Chillman A., Ramulu M., Hashish M. Effect of waterjet formation on surface preparation and profiling of aluminum alloy // Wear, 2008, vol. 265, no. 1-2, pp. 176 - 185.
25. Gudimetla P., Wang J., Wong W. Kerf formation analysis in the abrasive waterjet cutting of industrial ceramics // Journal of Materials Processing Technology, 2002, vol. 128, no. 1-3, pp. 123 - 129.
26. Liu H., Wang J., Kelson N., Brown R.J. A study of abrasive waterjet characteristics by CFD simulation // Journal of Materials Processing Technology, 2004, vol. 153-154, pp. 488 - 493.